

Kopplung von BEM und Strahlenverfahren zur Berechnung von Schallausbreitung im Freien

Sebastian Hampel, Sabine Langer, Heinz Antes

Institut für Angewandte Mechanik, D-38106 Braunschweig, Germany, Email: sebastian.hampel@tu-bs.de

Einleitung

Bei der Schallausbreitung im Freien spielt gerade über größere Distanzen die Brechung, die aus Wind- und Temperaturprofilen resultiert, eine große Rolle. Es existiert bislang kein numerisches Verfahren, das sowohl Wellenphänomene - insbesondere Beugung - als auch solche Brechungseffekte berücksichtigt und trotzdem über größere Ausbreitungsdistanzen mit vertretbarem Aufwand das Schallfeld berechnet. Oft ist dabei das Auftreten von Beugungseffekten an Hindernissen auf einen kleinen Teil des betrachteten Gebiets begrenzt. Für diesen Fall wird im Folgenden ein hybrides Modell vorgestellt, das die Randelementmethode (engl. Boundary Element Method, BEM) als wellenbasiertes Verfahren mit dem Raytracingverfahren aus der geometrischen Akustik verbindet: Im Nahfeld um Hindernisse und komplexe Geometrien, wo Beugung und Mehrfachreflexionen zu erwarten sind, wird die Randelementmethode verwendet. Daran wird für die Berechnung des Schallfeldes im Fernfeld ein Strahlenmodell gekoppelt.

Brechung

Eines der wichtigsten Phänomene bei der Schallausbreitung im Freien ist die Brechung. Eine kontinuierliche Änderung der effektiven Schallgeschwindigkeit in Form eines Wind- oder Temperaturprofils bewirkt eine kontinuierliche Brechung, die in gekrümmten Schallstrahlen resultiert. Der meist ungünstigste und damit maßgebende Fall ist dabei die abwärts brechende Atmosphäre. Sie entsteht z.B. bei Temperaturinversion - d.h. bei einer mit der Höhe zunehmenden Temperatur - (Abb. 1) oder bei Schallausbreitung in Mitwindrichtung, da die Windgeschwindigkeit in der Regel mit der Höhe zunimmt (Abb. 2).

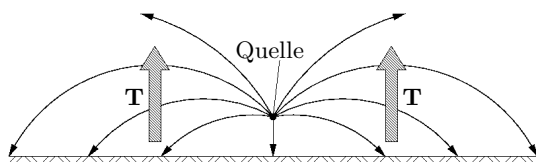


Abbildung 1: Brechung infolge eines Temperaturprofils

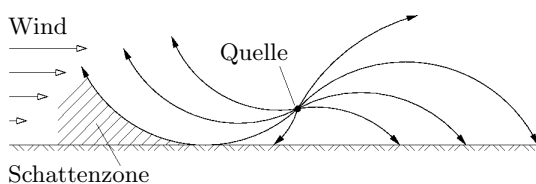


Abbildung 2: Brechung infolge eines Windprofils

BEM-Modell

Die Randelementmethode (BEM) hat sich in der Akustik und speziell für Außenraumprobleme als geeignetes numerisches Verfahren erwiesen, weil damit zum einen der Diskretisierungsaufwand um eine Dimension herabgesetzt wird und zum anderen die SOMMERFELDSche Abstrahlbedingung implizit erfüllt wird. Wellenphänomene wie Beugung werden berücksichtigt. Die Grenzen der BEM liegen in der rechenintensiven Gleichungslösung und zum anderen in der Beschränkung auf homogene Medien. Quasi-lineare Schallgeschwindigkeitsprofile sind allerdings durch das sog. *Conformal Mapping* möglich (siehe dazu [1] und [2]).

Strahlenverfahren

Statt vom Wellencharakter der Schallausbreitung gehen die Verfahren der geometrischen Akustik vom Teilchencharakter des Schalls aus. Es werden in Abhängigkeit der Geometrie und des Mediums Schallstrahlen ermittelt, d.h. die möglichen Ausbreitungswege der Teilchen von der Quelle zum Empfänger. Die Anteile der Strahlen werden dann zum Gesamtschalldruck am Empfänger aufsummiert. Der Rechenaufwand dieser Verfahren ist in der Regel erheblich geringer als bei Diskretisierungsverfahren wie der BEM und sie können ein Wind- und Temperaturprofil relativ einfach berücksichtigen. Da der Wellencharakter vernachlässigt wird, eignen sich diese Verfahren jedoch wiederum nicht zur Erfassung von Wellenphänomenen wie Beugung. Für die Kopplung mit der BEM ist das semi-analytische Verfahren nach SALOMONS [3] besonders geeignet, da es im Gegensatz zu den meisten Raytracingverfahren im Frequenzbereich rechnet.

Kopplung

Entscheidend für eine Kopplung der beiden Verfahren ist, dass das Raytracingverfahren als Eingangsdaten Punktquellen und deren Quellintensität benötigt. Aus der BEM-Rechnung können jedoch nur Druck- oder Flussverteilungen ermittelt werden. Zur Umrechnung von einer Druckverteilung in eine Quellverteilung kann man sich der Indirekten Randelementmethode bedienen. Aus der Randintegralgleichung [4]

$$\int_{\Gamma_{IF}} G(x, \xi) a^*(\xi) d\Gamma_{\xi} = \bar{p}(x) \quad (1)$$

mit bekanntem Druck \bar{p} und gesuchter Quellintensität a^* auf dem Interface Γ_{IF} wird in diskreter Form ein Gleichungssystem, aus dem die Quellintensitätsverteilung berechnet wird. Schließlich wird die Quellintensität über jedes Element integriert und dieses durch eine äquivalente

Punktquelle ersetzt. Die Verifikation der Kopplungs-

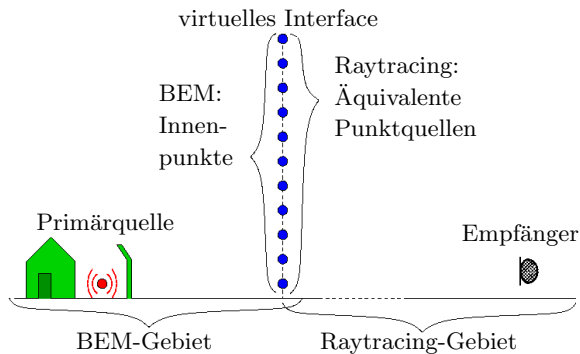


Abbildung 3: Aufbau der Berechnungsgebiete und der Kopplung am virtuellen Interface

methode wird am Fall eines homogenen Halbraums mit schallhartem Boden durchgeführt. Für diesen Fall liefert die BEM abgesehen von Diskretisierungsfehlern die exakte Lösung in *einem* Rechenschritt. Die zu vergleichenden Ergebnisse werden mit einem Drei-Schritt-Verfahren ermittelt:

1. Die Direkte BEM mit der Primärquelle liefert die Druckverteilung entlang eines virtuellen Interfaces, welches als Netz von Innenpunkten modelliert wird.
2. Die Druckverteilung wird mit Gl. (1) in äquivalente Punktquellen umgerechnet.
3. Diese werden als Lasten für den dritten Berechnungsschritt mit der Direkten BEM verwendet.

Der relative Fehler ist u.a. abhängig von der gewählten Diskretisierung des Interface, der Höhe des Interface infolge Diskretisierungsabbruchs (siehe Abb. 4) und von der Anregungsfrequenz. Insgesamt zeigen sich für die verwendeten Konfigurationen nur geringe Fehler im Bereich von weniger als ein Prozent. Für die eigentliche hybride Berechnung (BEM-Raytracing) wird im dritten Berechnungsschritt die Direkte BEM ersetzt durch das Strahlenverfahren.

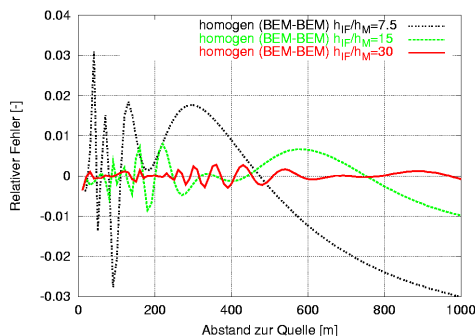


Abbildung 4: Abnahme des relativen Fehlers der Kopplungsmethode für steigende Interfacehöhen.

Ergebnisse

Als Beispiel wird eine Punktquelle vor einer Schallschutzmauer betrachtet, hinter der in einer Distanz von 50 bis

1000 m der Schalldruck an virtuellen Empfängern ausgewertet wird. Diese Situation wird jeweils für eine homogene und eine abwärts brechende Atmosphäre berechnet und verglichen. Abb. 5 und Abb. 6 zeigen diesen Vergleich für Frequenzen von 100 bzw. 500 Hz. Der relative Schalldruckpegel (Ref: Freifeld) liegt bei der abwärts brechenden Atmosphäre um bis zu 10 dB über den Werten für den homogenen Fall.

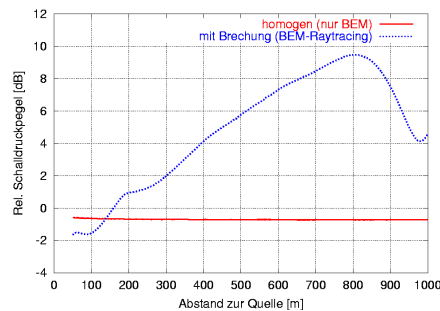


Abbildung 5: Vergleich zwischen homogener und abwärts brechender Atmosphäre, $f = 100$ Hz, mit Schallschutzmauer.

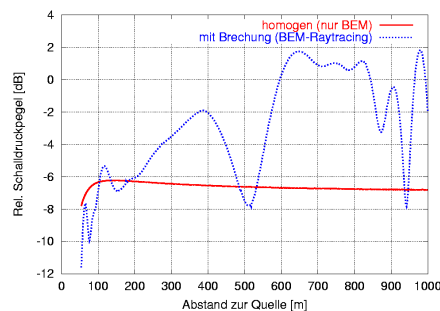


Abbildung 6: Vergleich zwischen homogener und abwärts brechender Atmosphäre, $f = 500$ Hz, mit Schallschutzmauer.

Zusammenfassung

Mit der vorgestellten Kopplungsmethode können ein wellenbasiertes Diskretisierungsverfahren und ein Raytracingverfahren zu einem hybriden Modell zusammengefügt werden. Das hier gezeigte Modell mit der BEM und einem semi-analytischen Strahlenmodell nach SALOMONS liefert vielversprechende Ergebnisse.

Literatur

- [1] K. M. Li und Q. Wang: A BEM approach to assess the acoustic performance of noise barriers in a refracting atmosphere, JSV(1998) **211**(4), p.663-681.
- [2] S. Hampel, S. Langer und H. Antes: Representing outdoor sound propagation effects with a BEM model, Proceedings of CFA/DAGA '04, 2004.
- [3] E. M. Salomons: Computational atmospheric acoustics, Kluwer Academic Publishers, 2001.
- [4] H. Antes: Anwendungen der Methode der Randelemente in der Elastodynamik und der Fluidmechanik, Math. Methoden in der Technik **9**, Teubner Stuttgart, 1988.